

多層すみ肉溶接継手の残留応力について

佐 藤 進*

Study on Residual Stresses in
Multi Pass Fillet Welded Joint.

Susumu Satoh

In this study, a series of theoretical analysis of elasto-plastic behavior of multi pass fillet welded joints was performed under various restraint conditions and interpass temperatures for mild steel by the finite element method.

The results obtained in this report are summarized as follows.

- (1) The restraint for rotation has great influence on the residual stresses near the weld bead. For example, the vertical stress at the root makes large tensile stresses under the higher restraint.
- (2) Residual stresses are also influenced by interpass temperature. They become relatively smaller when interpass temperature becomes higher.

1. ま え が き

近年溶接構造物の大型化に伴い高張力鋼等の厚板の使用が増加し、層数の多い溶接継手が用いられるようになってきている。この多層溶接継手においてトウ割れ、ルート割れ、ビード下割れ等の低温割れ防止溶接設計・施工条件を従来のような初層ルート割れ防止条件から決定する事は必ずしも適切ではなく、場合によっては非安全側の評価を与えることになる。すなわち、厚肉鋼材の多層溶接では溶接パス数が増加するにつれてルート部やトウ部の局所的な拘束応力が増大し、初層ルート割れ発生条件より厳しい条件になる場合がある。¹⁾このような場合には初層ルート割れが発生しなくても、その後の溶接過程や溶接終了後にルート割れ、トウ割れを発生することがある。また、これらの溶接割れから非金属介在物に沿って階段状に伝播するラメラテアが起ることもある。

そこで本論文では3パス2層すみ肉溶接継手を対象にして、FEM 2次元熱弾塑性解析法により板厚断面の残留応力を明らかにすると共に、この残留応力に及

ぼす各種因子の影響について、ある程度の数量化を行ったものである。

2. 温度分布解析

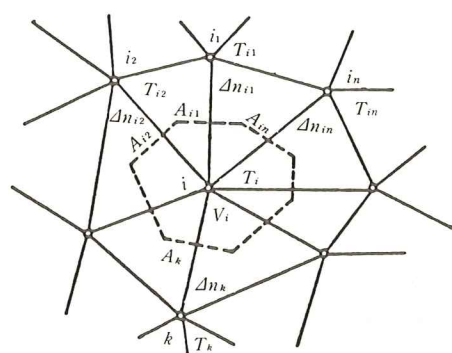
熱伝導解析には微分方程式より求められる関数解を用いる方法や有限要素法があるが、本論文では次のような差分解析法を用いた。

一般に Fig. 1 に示すような三角形要素において、内部節点のみを有する要素(a)及び外表面境界節点を有する要素(b)についてそれぞれ熱伝導及び熱伝達による熱の流れに関する平衡方程式を導けば、節点 i の時間 $t + \Delta t$ における温度は次式で与えられることが知られている。²⁾

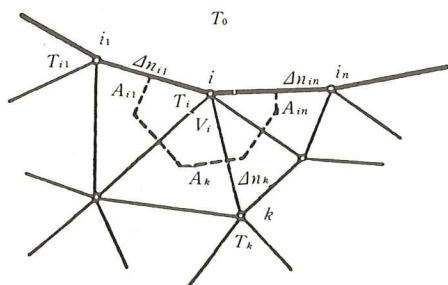
$$T_{i, t+\Delta t} = \frac{K \cdot \Delta Q_R}{V_i \cdot \lambda} + \left(1 - \frac{K \cdot \Delta t}{V_i} \sum_k \frac{A_k}{\Delta n_k} - \frac{F_i \cdot a \cdot K \cdot \Delta t}{V_i \cdot \lambda} \right) \cdot T_{i, t} + \frac{F_i \cdot a \cdot K \cdot \Delta t}{V_i \cdot \lambda} \cdot T_{0, t}$$

*機械工学教室

1980年10月31日受付



(a) Internal area



(b) Surface

Fig. 1 Heat conduction among triangular elements.

$$+ \frac{K \cdot \Delta t}{V_i} \cdot \sum_k \frac{A_k}{\Delta n_k} \cdot T_{k,t} \quad (1)$$

ここに A_k 領域 i と領域 k の境界断面積

n_k 節点 i と節点 k の熱流路長さ

F_i 領域 i の表面積

ΔQ_{ti} 領域 i における発熱量

V_i 領域 i の体積

λ 熱伝導率 K 熱拡散率

a 熱伝達率 $T_{0,t}$ 外部温度

ただし時間増分 Δt は熱力学第2法則により、要素分割の粗密及び境界条件と次の関係を満足させる必要がある。

$$\Delta t \leq \frac{V_i}{K \left(\sum_k \frac{A_k}{\Delta n_k} + \frac{a \cdot F_i}{\lambda} \right)} \quad (2)$$

以上の(1), (2)式を用いて Fig. 2 に示すような3パス2層盛すみ肉溶接継手の温度分布解析を行った。図中 $I_1 \sim I_3$ は $Q=15000 \text{ J/cm}$ の瞬間線熱源が逐次投与された節点を示している。Table 1 に温度解析で用いた材料定数, Fig. 3 に解析例として各パスにおける溶接部近傍の冷却時の等温度分布をそれぞれ示す。なお熱電対を用いて冷却曲線を求めたが計算と良い一致を得た。

3. 残留応力解析理論及び解析条件

溶接による熱応力問題を解析する手段としては、従

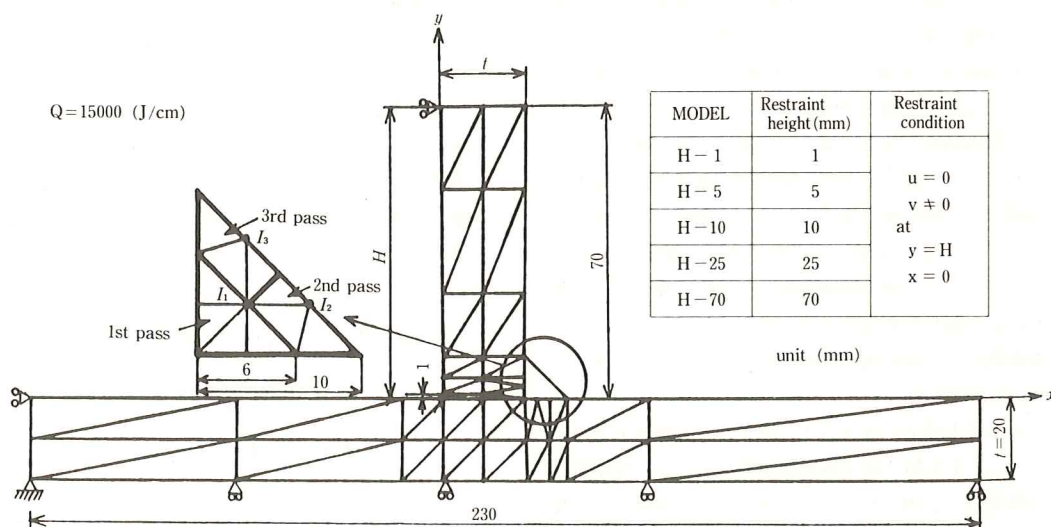


Fig. 2 Mesh division

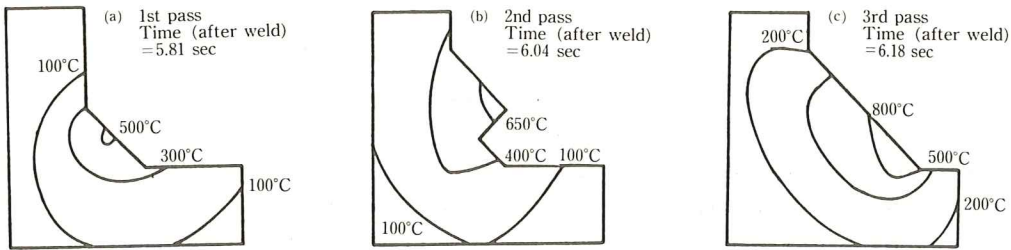


Fig. 3 Temperature distribution

Table 1 Material constant for thermal cycle analysis

Density : ρ	0.00772	[g/mm ³]
Specific heat : c	0.0629	[J/g/°C]
Heat conductivity : λ	0.0488	[J/mm/°C/sec]
Heat transfer coefficient : a	0.394×10^{-4}	[J/mm ² /°C/sec]
Thermal diffusivity : K	10.0	[mm ² /sec]

来より微分方程式を直接解く方法、変位ポテンシャル法、固有歪理論等があるが、最近では電子計算機の容量大型化と計算速度増に伴い有限要素法が主流になっている。本論文でも定歪三角形要素を用いた2次元FEM熱弾塑性解析手法に依ったので以下解析理論を簡単に述べる。^{3, 4)}

骨組構造解析の場合と同様に考えて、連続体についての平衡条件式は次式で与えられる。

$$\{R\}_g = [K]_g \cdot \{d\}_g - \{L\}_g \quad (3)$$

ここに

$\{R\}$ 外力の列ベクトル

$[K] = \int [B]^T [D] [B] dVol$ 剛性マトリックス

$\{L\} = \int [B]^T \{C\} \dot{T} dVol$ 初期歪による節点力

ベクトル

\dot{T} 温度増分

g 全体についての重量

溶接中は一般に外力が負荷されないと考えられるから、 $\{R\}_g \equiv 0$ と考えると差し支えなく増分形で表わせれば次式のようになり、未知節点変位増分 $\{d\}_g$ が求まる。

$$\{d\}_g = [K]_g^{-1} \cdot \{L\}_g \quad (4)$$

得られた節点変位増分から各要素の全歪増分、応力増分が式(5)、(6)より求められ前段階の結果に足込まれる。

$$\{\dot{\epsilon}\} = [B] \cdot \{\dot{d}\} \quad (5)$$

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \cdot \{\dot{\epsilon}\} - \{C\} \dot{T} \quad (6)$$

なお、 $\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}\}_e + \{\dot{\epsilon}\}_p + \{\dot{\epsilon}\}_r$ である。

$\{\dot{\epsilon}\}_e$ 弾性歪増分 $\{\dot{\epsilon}\}_p$ 塑性歪増分 $\{\dot{\epsilon}\}_r$ 熱歪増分

以上の理論をもとに作成した多層溶接用FEM熱弾塑性解析プログラムでは縦弾性係数(E)、降伏応力(σ_y)、線膨張係数(α)についてFig. 4のような温度依存性を考慮し、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。また材料は等方性材料であり、要素の降伏判定にはMisesの降伏条件を用いた。なお硬化特性は式(7)に示すような直線硬化性を仮定し、溶接金属部、熱影響部、母材間の

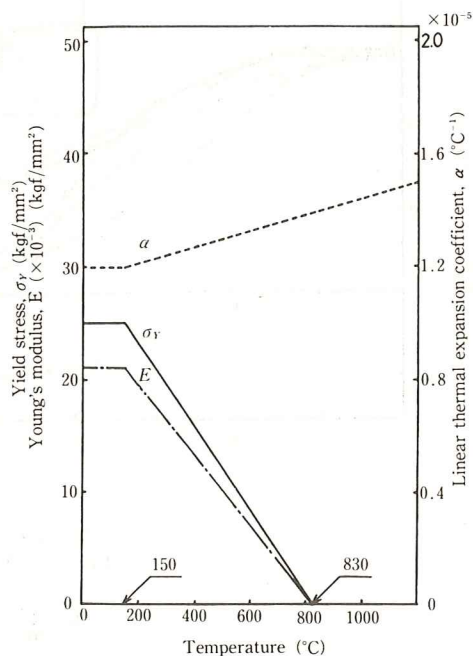


Fig. 4 Dependency of mechanical properties on temperature of material.

機械的性質の相違は考慮していないが、要素の再溶解に伴う応力の再分布を考慮に入れて解析を行った。

$$\bar{\sigma} = \sigma_v(1 + 3.0 \times \bar{\epsilon}_p) \quad (7)$$

$\bar{\sigma}$ 相当応力 $\bar{\epsilon}_p$ 相当塑性歪

解析に用いた三角形要素は Fig. 2 に示すように最小辺長 3mm, 第 1 層脚長 6mm, 第 2 層脚長 10mm であり, ウェブ板厚 20mm 及び 40mm, フランジ板厚 20mm である。解析は平面応力問題として行った。⁵⁾

4. 残留応力解析結果及び考察

4. 1 パス間温度の影響

ウェブ板の x 方向変位拘束距離 $H=70\text{mm}$ 一定として, パス間温度を 15°C , 200°C , 400°C の 3 種類変化

させた場合, フランジルート部の最大主応力の熱履歴は, Fig. 5-a~c のようになる。いずれのパス間温度においても 1 パス時の温度上昇時に最大 10kgf/mm^2 の圧縮応力を示すが, 以後の熱サイクルではほとんど引張応力となっている。またパス間温度が高くなるに従って, 1 パスの冷却時以後では引張応力はほぼ各温度における降伏面上を変動しているに過ぎず, パス間温度 15°C の場合とは異なった熱履歴を示している。次に残留応力に注目すると, パス間温度が高くなると共に残留応力は減少する傾向にあり, パス間温度を 400°C 程度の高温に保持すれば残留応力を 30~40% 軽減できる。以上のような特徴は溶接金属部, ウェブトウ部等においても同様であった。

4. 2 ウェブ板変位拘束の影響

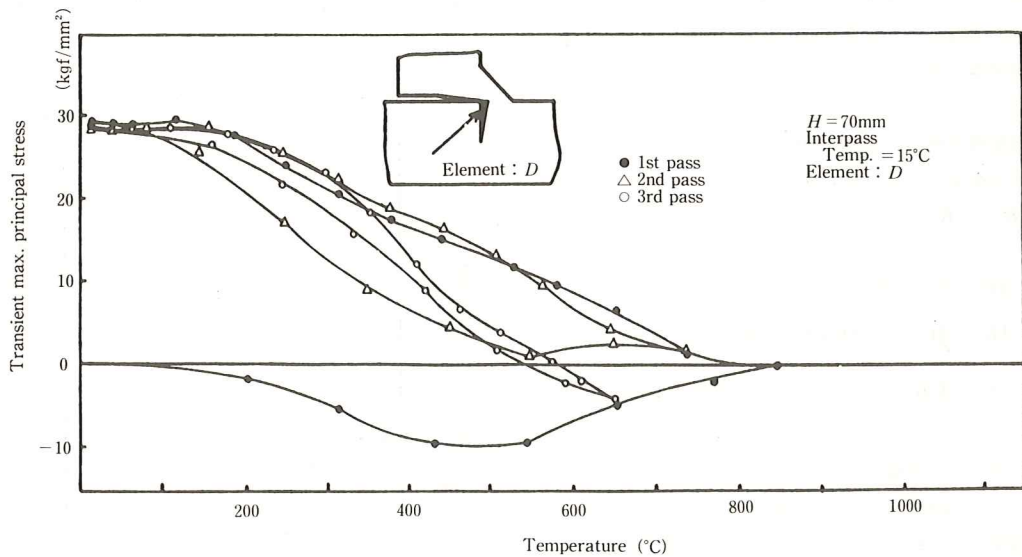


Fig. 5-a Thermal stress cycle

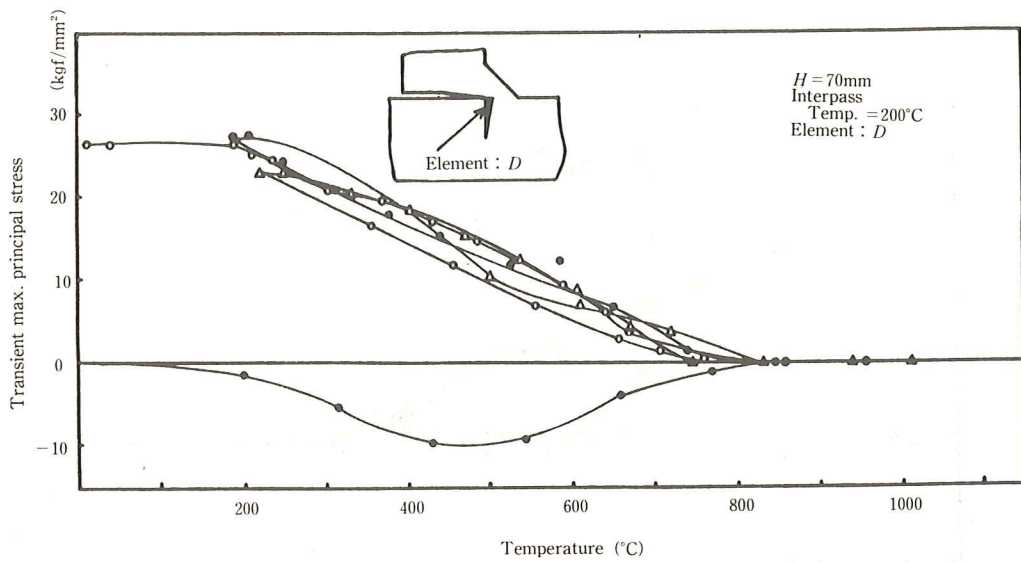


Fig. 5-b Thermal stress cycle

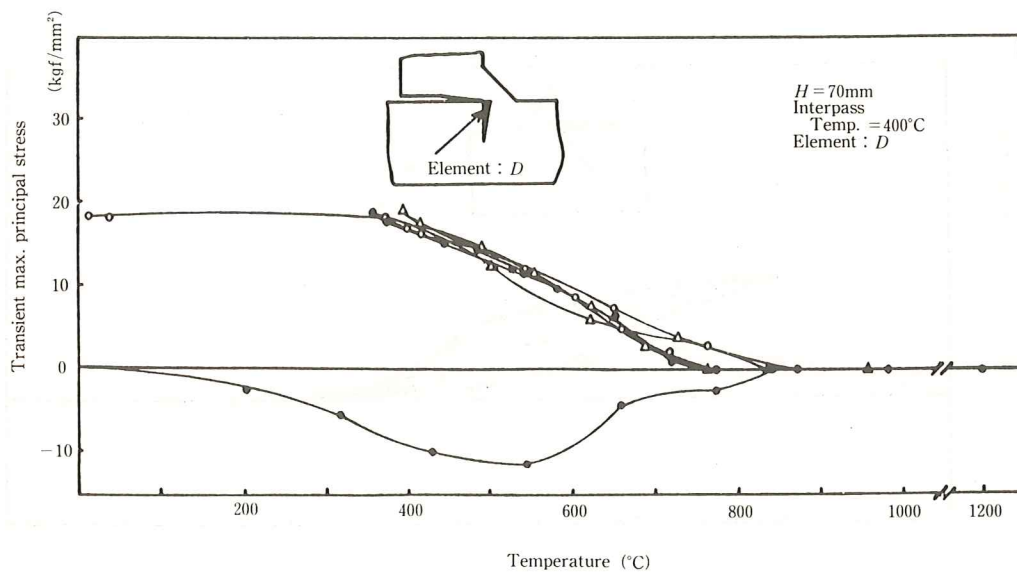


Fig. 5-c Thermal stress cycle

溶接金属の凝固・収縮に伴うウェブ板の倒れ込みに
 対する変位拘束条件(節点座標 $x=0, y=H$ で $u_x=0$)
 において拘束距離 H (Fig. 2 参照) が熱応力履歴や残

留応力分布に及ぼす影響について解析を行った。

Fig. 6-a, b は拘束距離 $H=5\text{mm}$ の場合と $H=70\text{mm}$ の場合のウェブ側ルート部の熱応力履歴を比較

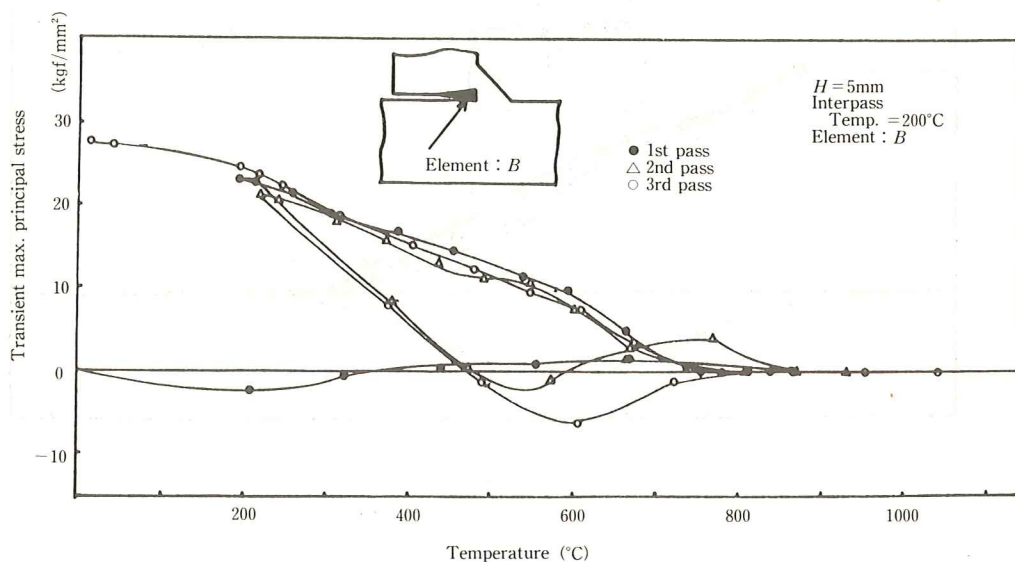


Fig. 6-a Thermal stress cycle

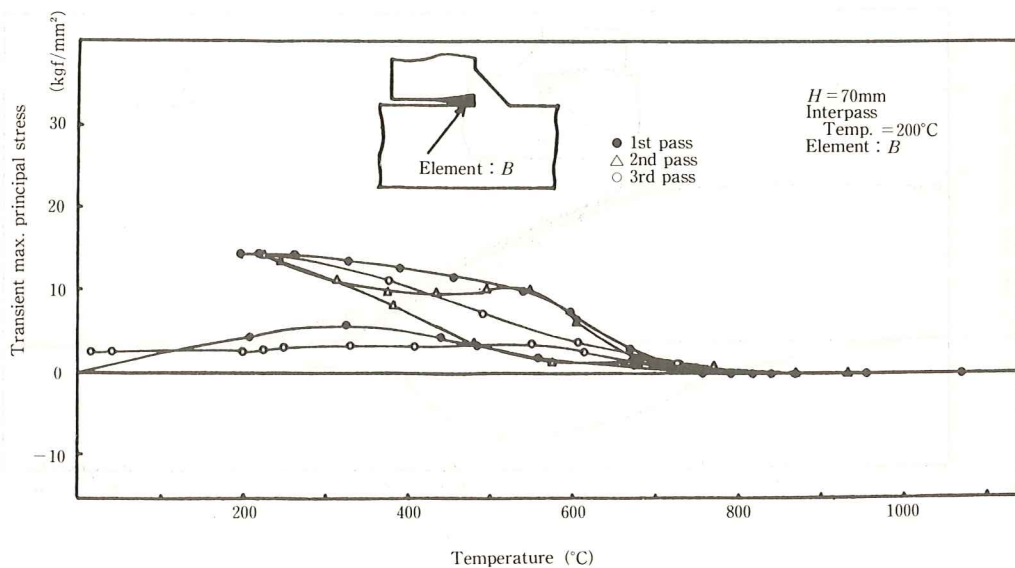


Fig. 6-b Thermal stress cycle

したものである。拘束距離が短い場合ウェブ板回転拘束・横方向変位拘束は厳しくなり温度上昇時には溶接金属部膨張に伴い大きな圧縮応力を受け、冷却時には逆に降伏応力程度の引張応力を受ける。その結果、残留応力も $H=70\text{mm}$ の場合 2.5kgf/mm^2 にすぎないが、 $H=5\text{mm}$ では 28kgf/mm^2 にも達している。このような拘束距離 H が残留最大主応力に及ぼす影響は溶接継手各部により異なり Fig. 7 のようになる。拘束距離 H の影響が最も大きいのは上述したウェブ・ルート部 (図中B) であり、フランジのトウ部では拘束距離にかかわらず常に降伏応力以上の値を示してい

る。割れ発生形態に対する拘束の影響から考えれば拘束の緩い状態ではフランジ・トウ部に割れ発生の可能性があり、拘束が厳しくなるに従いウェブ側の溶接金属ルート部に割れ発生の可能性が考えられるが、低温割れ発生にはこのような拘束応力の他に水素量、組織等の影響も考慮されなければならない。上田等の初層すみ肉溶接継手に関する解析によれば、 H が短い場合フランジのトウ割れの危険があり、拘束が厳しくウェブの横収縮を拘束する範囲に入ると、ウェブのルート、フランジのトウに割れが起こりやすいという結果を得ている⁶⁾が、この傾向は本解析で得た多層盛の結果と

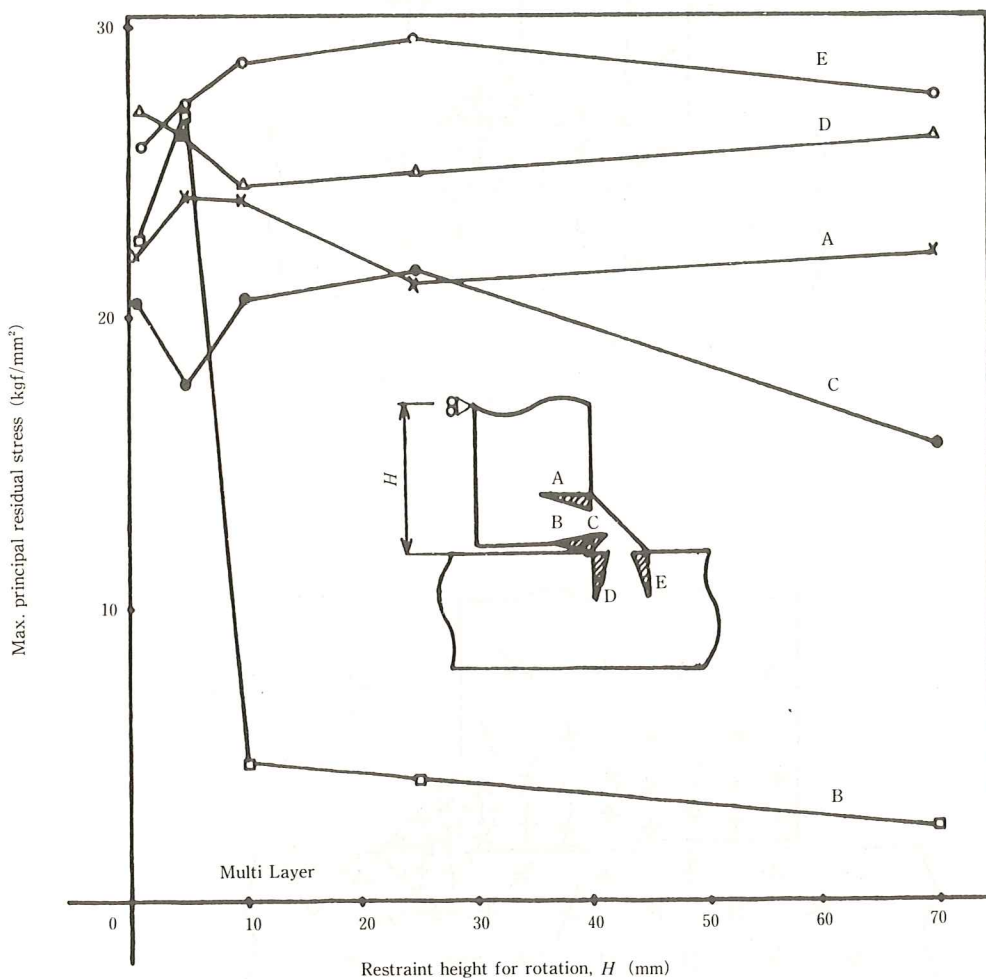


Fig. 7 Relationship between max. principal residual stress and restraint height for rotation.

類似している。ただし、ウェブのトウに関しては初層よりも多層の方が割れが発生しやすい傾向にある。

4. 3 ウェブ板厚の影響

同一溶接条件・拘束条件下でウェブ板厚が $t=20\text{mm}$

及び $t=40\text{mm}$ の場合の残留主応力分布を Fig. 8-a, b に示す。溶接金属部及び周辺において残留主応力の大きさや方向に顕著な差違は認められない。

なお4. 2項よりウェブ板回転変位拘束が厳しい条件下では両者に差異が生じることも考えられる。

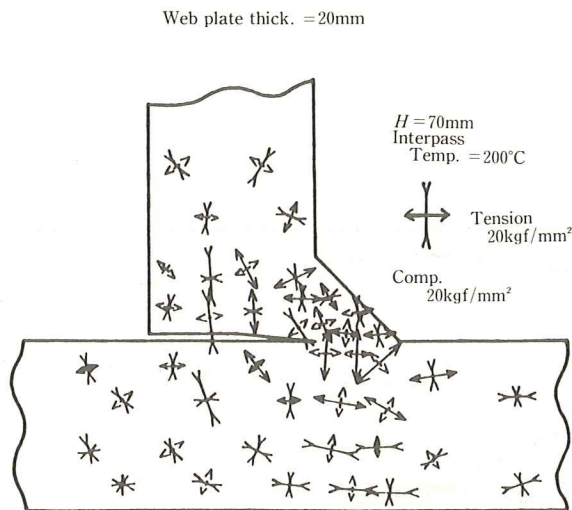


Fig. 8-a Relationship between max. principal residual stress and restraint height for rotation.

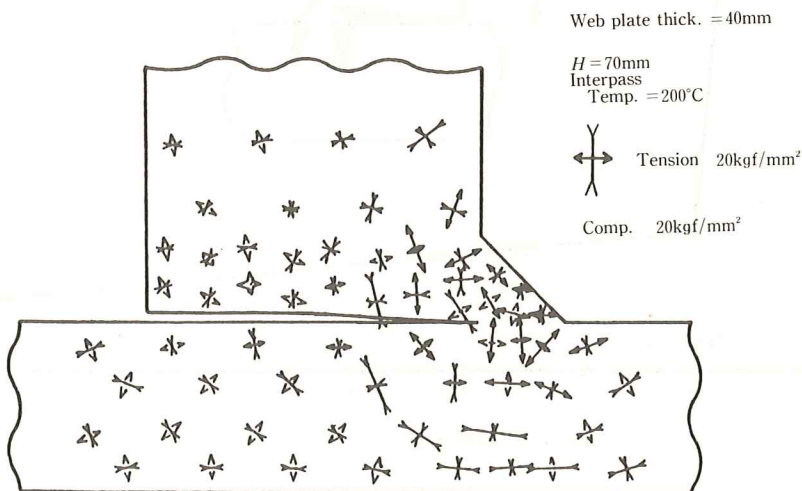


Fig. 8-b Residual principal stress distribution

4. 4 平面応力解析と平面歪解析について

溶接長がかなり長いすみ肉溶接継手の場合、前項までの平面応力解析のように溶接線方向応力 $\sigma_z = \text{一定}$ と考えるよりも平面歪解析として解析する方が妥当である。Fig. 9 に平面歪解析による残留主応力分布を示すが、前出の平面応力解析結果 Fig. 8-a と比較すればルート部を除いて溶接金属部近傍の残留応力値はいずれも小さくなっているのが認められる。これは溶接線方向残留応力が降伏応力程度に達しているためであると思われる。なお歪ゲージを用いた応力緩和法による残留応力測定結果も合わせて行ったがほぼ両解析の中間的な結果を得た。

5. ま と め

本研究では多層盛T型すみ肉溶接継手の残留応力を

求める FEM 熱弾塑性解析プログラムを作成すると共に残留応力に及ぼす種々の因子の影響について解析・検討を行い次のような知見が得られた。

- (1) パス間温度を 400°C 程度の高温に保持すれば溶接金属部及びその近傍の残留応力を 30~40% 軽減できるが、一般に用いられている低温割れ防止予熱・パス間温度範囲ではその効果はほとんど期待できない。
- (2) ウェブ板の回転拘束が緩い場合は、フランジのトウ部に割れ発生の可能性があり、拘束が厳しくなるに従いウェブ板側の溶接金属ルートに割れ発生の可能性が考えられる。この傾向は初層すみ肉溶接継手に関する結果と類似しているがウェブのトウ部では多層により割れ発生の可能性が増大する。
- (3) ウェブ板回転拘束が緩い場合、ウェブ板厚が 20~40mm に変化しても残留応力に変化は認められない。また平面解析結果ではルート部を除いた他の

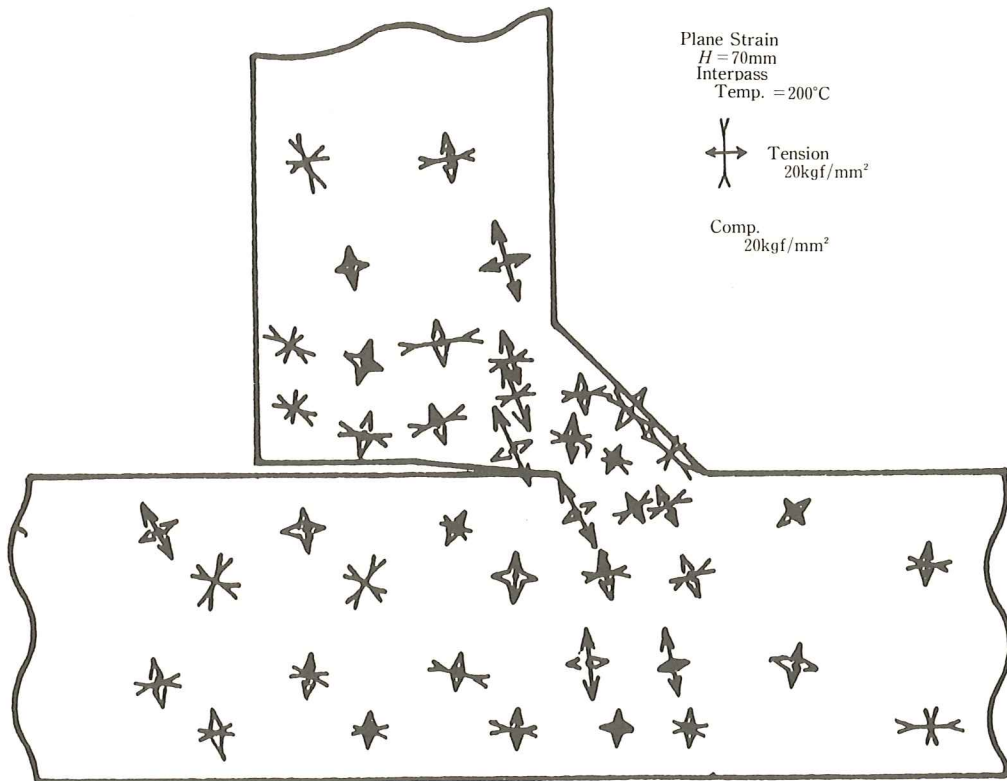


Fig. 9 Residual principal stress distribution

領域で平面応力解析結果よりも板厚断面の残留応力は減少している。

参 考 文 献

- 1) 稲垣道夫, 伊藤慶典: 高張力鋼・低温用鋼の溶接, 溶接全書11巻, 産報 (1978)
- 2) 佐伯庄吾, 岩城嵩: ピストン冠熱負荷解析法について, 日本舶用機関学会誌第4巻第1号 (1969)
- 3) 上田幸雄, 山川武人: 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌第42巻6号 (1973)
- 4) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接残留応力・溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌第45巻1号 (1976)
- 5) 佐藤進: 多層盛すみ肉溶接継手の残留応力解析, 溶接学会講概25集 (1979)
- 6) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治: 初層すみ肉溶接における残留応力と割れの形態について, 溶接学会誌第44巻3号 (1975)

